

APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN A LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS: OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN UNA CARRERA DE BAJO CONSUMO

Jordi Llumà, Juan Velázquez, Oriol Sala, Georgina Corestein

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Escola Universitaria d'enginyeria Tècnica Industrial (EUETIB)

c/ Comte d'Urgell 187 08036 Barcelona

jordi.lluma@upc.es

Resumen

La simulación por ordenador es una herramienta que permite ensayar múltiples condiciones de trabajo con un coste relativamente bajo. Por otro lado el cálculo numérico permite optimizar funciones no derivables de diversas variables.

Si se puede obtener una función objetivo del proceso (coste, consumo, etc...) la unión de simulación y cálculo numérico en un ordenador nos permite obtener las mejores condiciones de operación.

En el presente trabajo el proceso a simular es la estrategia de carrera de un vehículo en la Shell Eco-Marathon (carrera internacional de bajo consumo) y nuestra función objetivo el consumo de combustible.

Para evaluar el consumo es preciso modelar el motor, el embrague, el vehículo y el circuito con funciones continuas. Las variables que se pueden modificar en la estrategia de carrera son: la relación de transmisión, el número de veces que se arranca el motor, los puntos donde se arranca y la duración del arranque.

La implementación del sistema ha permitido diseñar, mediante un proyecto final de carrera, la estrategia de carrera del equipo **Eco Enginys Escola Industrial (EEEI)** para la 20ª Shell Eco Maratón.

1. INTRODUCCIÓN.

La Shell Eco Marathon es una carrera donde el objetivo es gastar la mínima cantidad posible de combustible para completar 7 vueltas al circuito de Paul Armagnac de Nogaro (departamento de Gers, Francia), 25,272 km en total. Para recorrer esta distancia se dispone de 50 m 34 s, lo que obliga a obtener una velocidad media de 30 km/h [1].

Una técnica habitual para reducir el consumo es utilizar los coches como vehículos híbridos, un motor de explosión genera la energía que se acumula en el vehículo, para posteriormente recuperarla. Cuando la carga de energía del vehículo es suficiente, el motor de explosión se para y permanece parado hasta

que las reservas energéticas están escasas. A diferencia de los coches híbridos comerciales, los vehículos de la Shell Eco Marathon, suele acumular la energía en forma de energía cinética, que emplean para seguir desplazándose y superar los desniveles del circuito. Cada vez que la reserva de energía cinética está baja, el motor de explosión se vuelve a poner en marcha, para acumularla de nuevo.

Cada puesta en marcha del motor implica una pérdida de energía, pues el combustible gastado en las primeras explosiones no repercute en una aceleración del vehículo. Por tanto es importante minimizar el número de veces que es necesario poner el motor en marcha.

Por otro lado, los motores de explosión tienen muy mal rendimiento a bajo número de vueltas, lo que provoca que no sea aconsejable reducir demasiado la velocidad (reservas de energía cinética) a la que éste se ponga en marcha.

Por último, a mayor velocidad del vehículo, mayores son las pérdidas de energía por fricción (aerodinámica, rodadura, etc...) lo que aconseja no subir excesivamente la velocidad máxima del vehículo.

Así pues, las pérdidas por arranque de motor aconsejan reducir al máximo el número de veces que éste se activa, pero el bajo rendimiento de los motores a bajas revoluciones y el incremento de pérdidas energéticas con la velocidad, aconsejan variar poco la velocidad y en consecuencia poner el motor muchas veces en marcha.

Obviamente existe un punto óptimo de funcionamiento entre ambos comportamientos, que permitirá obtener el mínimo consumo. Éste punto dependerá de una serie de factores como: curva de potencia del motor, curva de consumo del motor, curva de eficiencia del embrague, relación de transmisión, pérdidas de energía del vehículo, perfil de circuito.

En este trabajo se tienen en cuenta todos estos factores para conseguir minimizar el consumo de combustible durante la carrera. Obviamente hay otros factores que influyen como: velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, peraltes del circuito, trazado dentro del circuito, etc. que no se han tenido en cuenta por considerarse de momento efectos de segundo orden.

2. MODELIZACIÓN.

El primer paso para realizar cualquier simulación es, sin duda, obtener un modelo matemático de todos los factores que intervienen en el proceso. Para ello es necesario definir unas ecuaciones (normalmente diferenciales) que describan el proceso y obtener unas ecuaciones constitutivas de todos sus componentes. El resultado será tanto más preciso como lo sean el conjunto de ecuaciones y el método empleado para resolverlas.

En nuestro caso se ha considerado el vehículo descrito por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = e \cdot f \cdot \frac{Pot}{m \cdot v} - \left\{ \mu \cdot m \cdot \sin \left[\arctan \left(\frac{dy}{dx} \right) \right] + a_0 \cdot v + a_1 \cdot v^2 + a_2 \cdot \frac{v^2}{R} \right\} \quad (1)$$

donde v es la velocidad, t el tiempo, e la eficiencia de transmisión del embrague, f la relación de transmisión, Pot la potencia instantánea del motor, m la masa total del vehículo, y la altura sobre el nivel medio del circuito, R el radio de curvatura del circuito en ese punto y μ , a_0 , a_1 , a_2 parámetros a ajustar.

Seguidamente se describe la forma de modelar cada elemento de la ecuación.

2.1. Modelización eficiencia de la transmisión del embrague.

Para realizar el modelado del embrague se han partido de los datos obtenidos por la adquisición de datos durante la aceleración del vehículo desde 0 a 50 km/h en una recta sin desnivel. Concretamente se ha medido la relación entre las revoluciones del motor (corregidas por la relación de transmisión aplicada) y la de las ruedas. La discrepancia entre estos valores se debe a un deslizamiento entre las partes del embrague y se produce en consecuencia una pérdida de eficiencia.

La curva de eficiencia obtenida se ha ajustado mediante un suavizado por ajustes locales a polinomios de segundo grado ("spline"), y un posterior redondeo de valores cercanos a 0 y 1. El resultado se muestra en la figura 1.

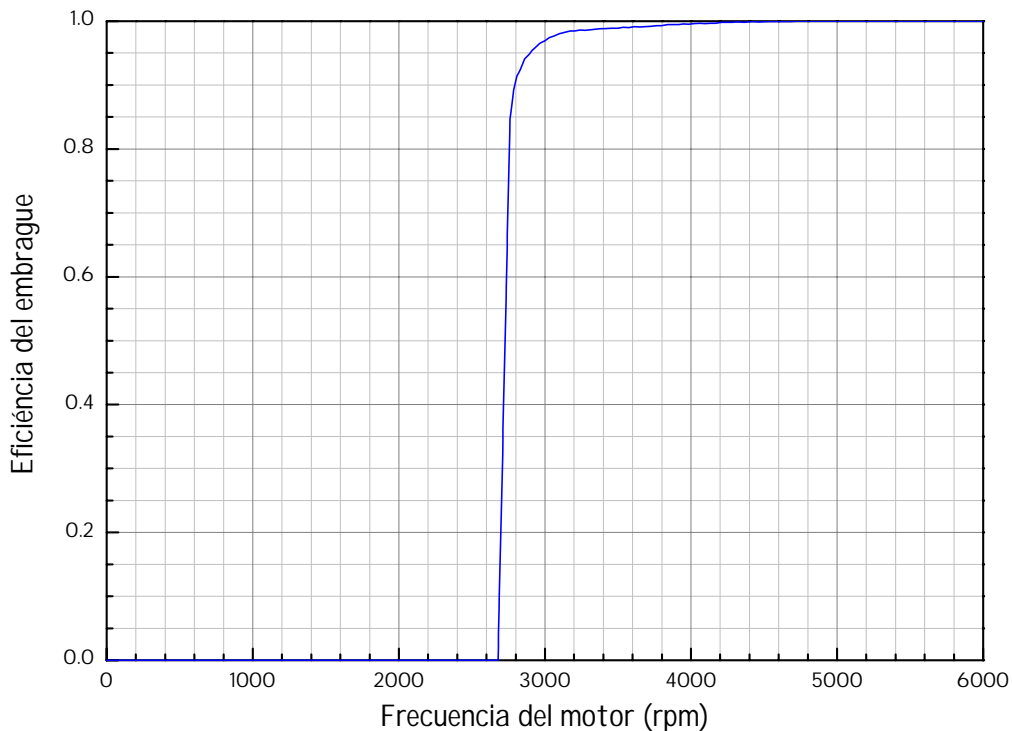


Figura 1.- Curva de eficiencia del embrague

Debido a que los desniveles del circuito tienen pendientes inferiores al 2% se ha supuesto que el comportamiento del embrague no variará

significativamente, y que en consecuencia este funcional es correcto para cualquier situación.

2.2. Caracterización del motor.

La caracterización del motor (potencia y consumo) se obtiene de un banco de potencia de diseño propio [2-5], que permite medir simultáneamente ambas curvas y ajustar los parámetros de la inyección electrónica del vehículo.

Como el número de puntos obtenidos en el banco de potencia es muy escaso se han interpolado los valores entre puntos con un conjunto de polinomios de tercer grado que garantizan la continuidad de la curva y su primera derivada. De todos los conjuntos de polinomios posibles se ha tomado como correcto aquel que de un comportamiento general más suave (minimice la longitud total de la curva). Los resultados se muestran en las figuras 2a y 2b.

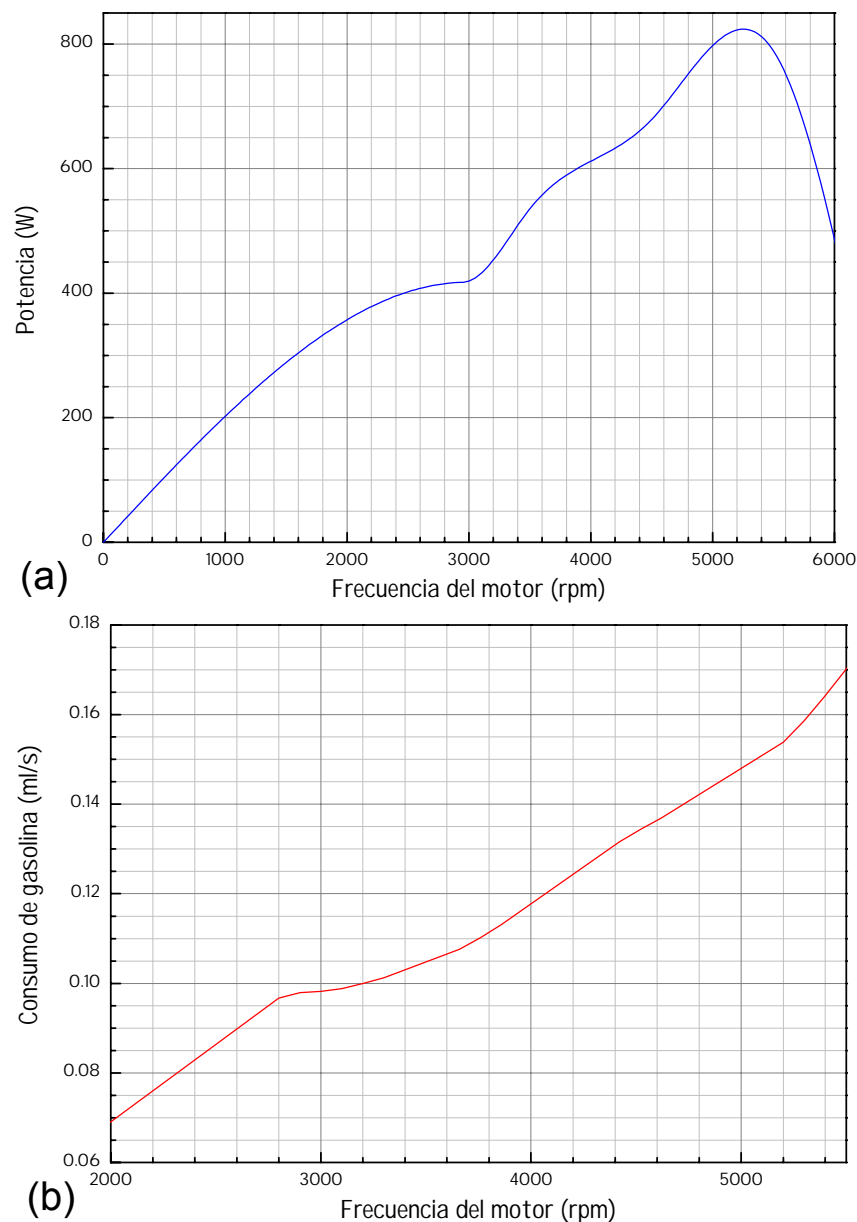


Figura 2.- Curva de potencia (a) y consumo (b) del motor.

2.3. Modelización del Circuito.

A partir de la planimetría del circuito [6] se ha obtenido el perfil del circuito y los radios de curvatura.

Como el conjunto de medidas de las alturas del circuito es relativamente escaso, ha sido preciso realizar el mismo método de interpolación que en el caso del motor: conjunto de polinomios de tercer grado con valor y derivada continua en las uniones que minimice la longitud total de la curva. En este caso además ha sido preciso imponer la periodicidad de la curva, al ser esta cerrada. El resultado puede verse en la figura 3.

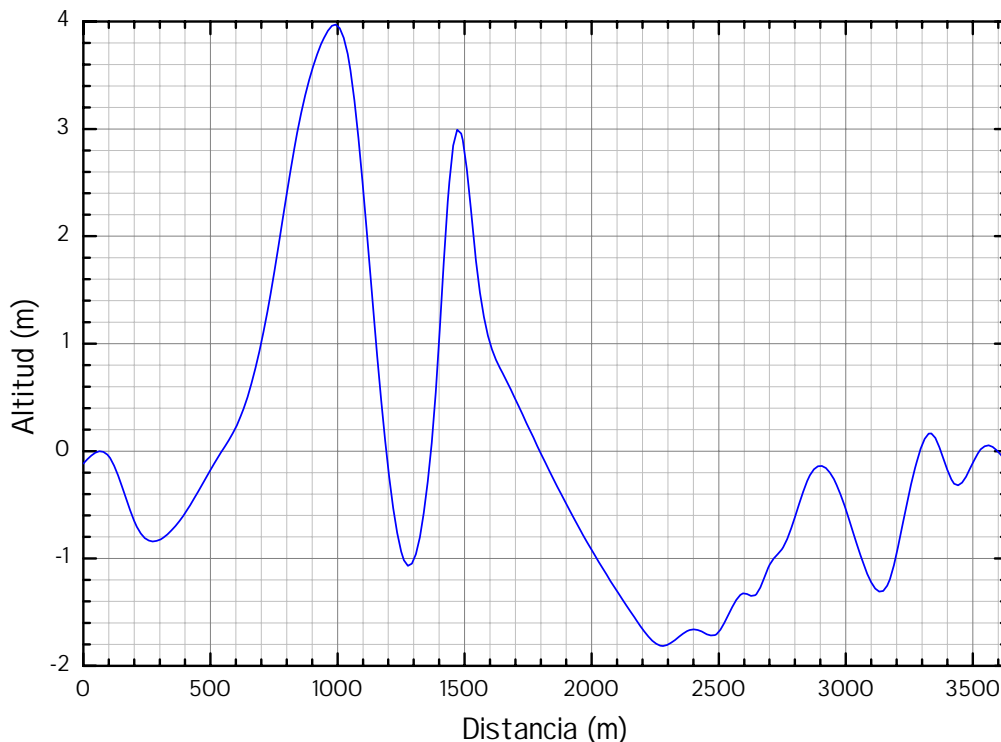


Figura 3.- Perfil de alturas del circuito de Nogaro respecto a su altura media.

Los radios de curvatura se extrajeron de la descripción por tramos del circuito obtenidos de la figura 4. A cada tramo se le asignaba un valor de curvatura fijo, igual al radio de curvatura del tramo.

2.4. Ajuste de parámetros de pérdida.

Los parámetros de los que no se pudo obtener información empírica, es decir, los coeficientes de pérdida del vehículo (μ , a_0 , a_1 y a_2), se estimaron a partir de datos empíricos con la siguiente metodología.

De unas vueltas de prueba al circuito, se extraen los datos de la adquisición de datos de todos los tramos del circuito donde el motor no estaba en activo, con el fin de obtener el mayor conjunto de datos posible y eliminar el efecto del motor y embrague de las ecuaciones.

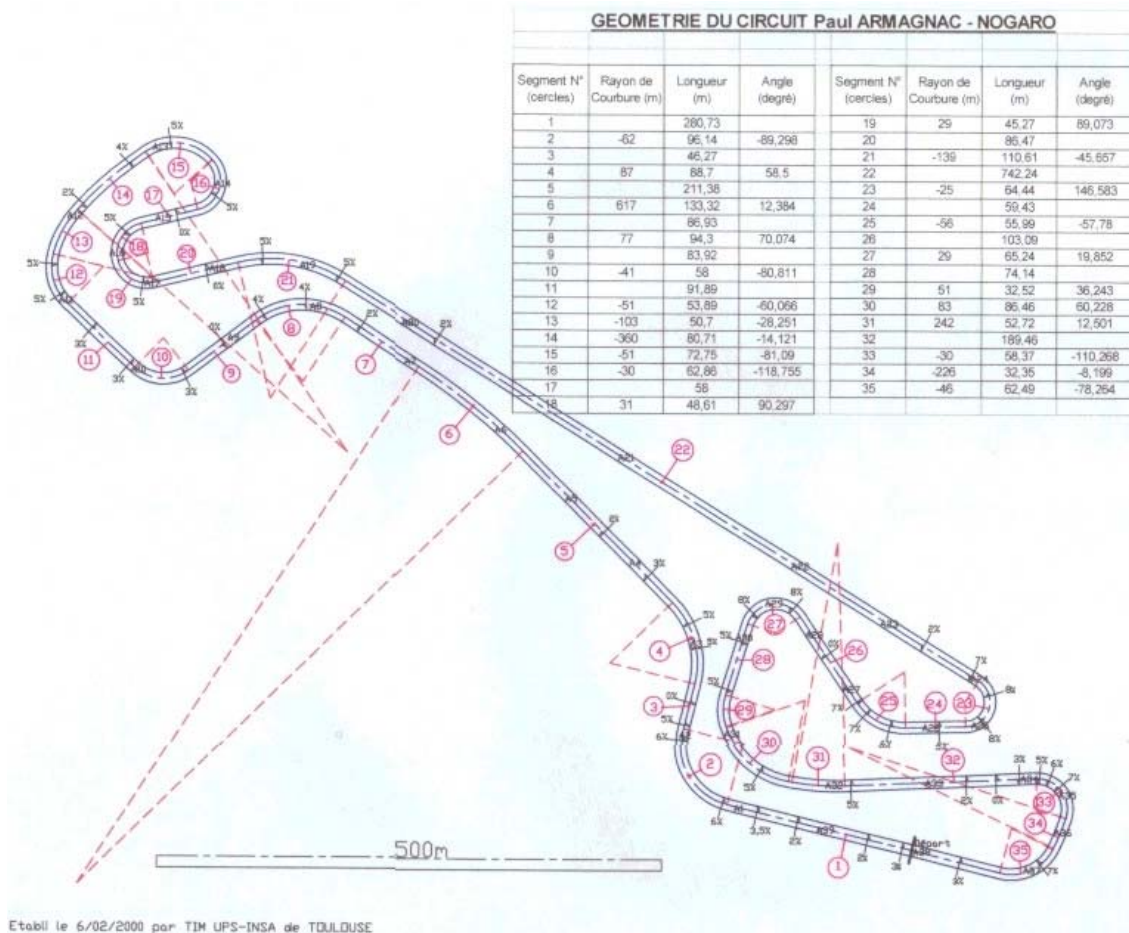


Figura 4.- Descripción por tramos del circuito de Nogaro.

Se asignan unos valores de prueba a los parámetros de pérdida y se integra la ecuación 1 según un algoritmo Runge-Kutta de 4º orden [7], teniendo en cuenta el perfil del circuito y la curvatura de sus tramos.

Seguidamente se calcula la discrepancia (F) de los valores de velocidad calculados respecto a los medidos.

$$F = \sum_i (v_i - \tilde{v}_i)^2 \quad (2)$$

donde v_i es la velocidad medida en el instante i y \tilde{v}_i la velocidad calculada en ese momento.

Se repite las operaciones anteriores N veces (donde N es el número de parámetros a calcular, 4 en éste caso) obteniéndose N valores de discrepancia. El conjunto de los $N+1$ parámetros y discrepancias se emplean como valores de inicialización de un algoritmo Simplex [7] que minimiza la discrepancia y, en consecuencia, se obtienen los parámetros óptimos.

Todas las operaciones anteriores se repiten para diversos conjuntos de valores de prueba de los parámetros de pérdida del vehículo, para garantizar que el algoritmo Simplex converge sobre el mínimo absoluto. Los resultados obtenidos para un tramo se muestran en la figura 5.

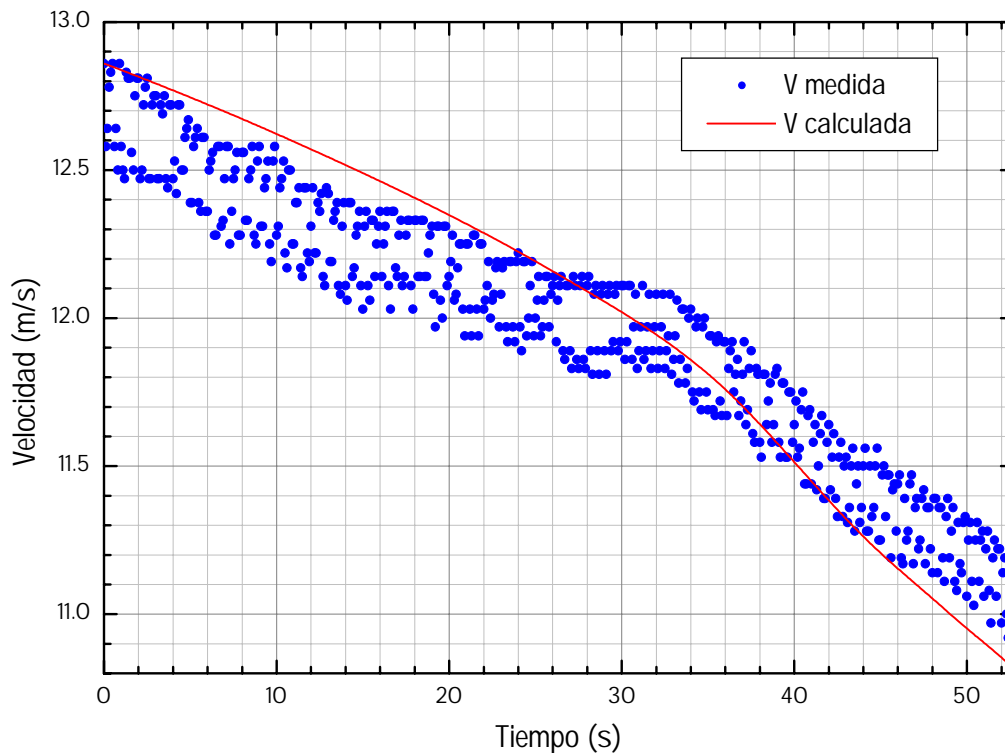


Figura 5.- Velocidad medida (puntos) y calculada (línea) para un tramo del circuito.

3. OPTIMIZACIÓN.

Una vez obtenidos los parámetros que definen el vehículo, ya se está en condición de simular su comportamiento en el circuito.

En un ordenador Pentium III a 850 MHz, el programa simula toda la carrera en décimas de segundo bajo un sistema operativo Linux y en algunos segundos (100 veces más lento) en Windows.

Con estas velocidades de cálculo, es posible hacer varios centenares de simulaciones por minuto (en Linux), lo que permite emplear de nuevo un algoritmo Simplex para buscar las condiciones que minimicen el consumo.

En este caso las variables independientes son la relación de transmisión y la velocidad máxima del vehículo, pues la velocidad mínima se obtiene al imponer la velocidad media. Para garantizar que la velocidad media es superior a 30 km/h, se reserva 1 minuto del tiempo de carrera como factor de seguridad, y se impone una velocidad media de 30.6 km/h.

Para inicializar el algoritmo Simplex se generan varios conjuntos de parámetros de prueba y se realiza el cálculo con cada uno de ellos, con el fin de garantizar la convergencia del algoritmo sobre el mínimo absoluto.

4. RESULTADOS.

Los resultados obtenidos convergieron sobre un punto con una relación de transmisión cercana a la que se empleaba tras años de experiencia (0.092) y una velocidad máxima superior a la empleada en carrera (43.8 km/h).

El consumo estimado fue de 1041 km/L de gasolina. La mejor marca obtenida experimentalmente era de 640 km/L de gasolina, lo que representa una reducción del consumo de 38 %.

Los resultados obtenidos con la nueva configuración permitieron obtener una marca de 1066 km/L de gasolina con una velocidad media de 30.5 km/h, muy cercana a la calculada mediante simulación.

5. Conclusiones.

Una correcta modelización del sistema y la simulación de su comportamiento ha permitido probar distintas configuraciones del vehículo sin la necesidad de estar presentes en el circuito ni de hacer los cambios pertinentes, con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero.

La configuración obtenida por métodos de minimización matemática han permitido obtener un ahorro de combustible del 38% sobre la mejor marca obtenida con varios años de experiencia. La discrepancia entre el valor experimental y el calculado es menor del 1%.

Es de esperar, que la sofisticación del modelo y la introducción de mayor número de parámetros independientes en la minimización del, permitan aún mayores ahorro de combustible en competiciones futuras.

6. Referencias.

- [1] Shell Eco Marathon 2004 "Reglamento", Shell España, S.A., www.shel.com
- [2] P. Enríquez, A. Pelarda, "Modelización de un inyector para un motor de combustión interna", Proyecto Final de Carrera EUETIB (UPC) 2004.
- [3] J. Fernández, R. Gil, "Desarrollo de un banco de frenado con secuencia programable para el ensayo y puesta a punto de motores de combustión interna", Proyecto Final de Carrera EUETIB (UPC) 2004.
- [4] S. Juan, D. Santos, "Placa electrónica de control genérica para motores de corriente continua", Proyecto Final de Carrera EUETIB (UPC) 2004.
- [5] A. Calafat, D. del Ojo, "Desarrollo de la electrónica de un sistema de frenado para motores térmicos con secuencia programable", Proyecto Final de Carrera EUETIB (UPC) 2003.
- [6] <http://www.tim-upsa.fr>

[7] W. H. Press, "Numerical recipes in C the art of scientific computing"
Cambridge, New York Cambridge University